

УДК 519.873+519.876

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОРГАНИЗАЦИИ
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СООБЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ
ВЕРОЯТНОСТНО-АЛГЕБРАИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ****Д.В. Ратобыльская***Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель***CHOICE OF THE RATIONAL VARIANT OF THE ORGANIZATION
OF THE TRANSPORT NETWORK COMMUNICATIONS ON THE BASIS OF
PROBABILITY-ALGEBRAIC SIMULATION****D.V. Ratobylskaya***F. Scorina Gomel State University, Gomel*

Статья посвящена применению метода вероятностно-алгебраического моделирования для исследования вероятностных характеристик сложных систем. Содержит описание идеи метода и методологию вероятностно-алгебраического моделирования. В статье приведен пример описания модели транспортной сети и оценка организации сообщения средствами метода.

Ключевые слова: вероятностно-алгебраическая модель, моделирование, граф, транспортная сеть, сеть сообщения.

The paper is devoted to the application of the method of probability-algebraic simulation for research of probability characteristics of complex systems. It contains the description of the idea of the method and methodology of probability-algebraic simulation. In the paper the example of the description of the transport network model and estimation of the organization of communications is presented by method means.

Keywords: probability-algebraic simulation, modeling, graph, transport network, message network.

Введение

Широкое применение в исследовании и тестировании сложных технических производственных систем к настоящему времени получили методы теории графов.

Графовые модели как средство описания топологии и функциональных схем больших и структурно-сложных систем составляют методическую базу в решении задач оптимизации и планирования технологических процессов и сетевых структур. Вопросам разработки и применения данного класса методов, методик и базирующихся на них автоматизированных систем управления посвящено большое количество работ зарубежных авторов, среди которых можно отметить Р. Барлоу, И.М. Соболя, Д.А. Поспелова, И.А. Рябинина, А.А. Шальто, А.С. Можаяева, С. Меллора, В. В. Boehm.

Широкий класс систем, описываемых графами, составляют потоковые системы, к которым относят транспортные сети сообщения (ТСС) [1]. Организация и эксплуатация данного класса систем предусматривает, как правило, несколько вариантов исполнения предписанных им функций. Поэтому оценка их эксплуатационных характеристик включает рассмотрение различных вариантов организации функционирования сети.

С позиций анализа вероятностных характеристик исследуемого объекта для представления

потоковых систем применяются как статические, так и динамические модели. Для статического исследования характеристик используются аналитические методы и средства их автоматизации. Применение указанных методов ограничено числом возможных к рассмотрению состояний составных частей и системы в целом. В качестве примеров реализации можно выделить программные комплексы АРБИТР (ПК АСМ СЗМА – программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования) [2] и Relex Reliability Studio [3], представляющие модели исследуемого объекта в виде графа. Среди динамических моделей наиболее широко применимы методы, основанные на статистическом имитационном моделировании [4]. Данные методы и реализованные на их базе системы моделирования входят в состав крупных коммерческих проектов, как правило, носят узкоспециализированный характер и высокую стоимость.

Сочетанием статического и динамического моделирования, позволяющим учитывать множество изменяющихся во времени вероятностных характеристик участков сети (потоковой системы) и её структурную организацию, является метод вероятностно-алгебраического моделирования (ВАЛМ) [5].

Приводимое в статье исследование направлено на решение задачи выбора рационального варианта организации ТСС, описываемой

графовой структурой. Анализ организации и функционирования системы основан на методе ВАЛМ, методика применения которого излагается в статье.

1 Критерий сравнения вариантов организации транспортной сети сообщения

С точки зрения оценки уровня организации функционирования ТСС, ключевым показателем является соотношение максимальной пропускной способности сети и качества обслуживания транспортного потока.

Пропускная способность сети (PR) указывает на максимально возможное количество единиц транспорта, которое она способна пропустить за выбранную единицу времени. Критерий качества обслуживания интегрального транспортного потока (W) определяется временем и стоимостью перемещения транспортных единиц и для обобщенной ТСС и задается следующим образом:

$$W^* = \delta_1 \cdot T^* + \delta_2 \cdot Q^*, \quad \sum_{i=1}^2 \delta_i = 1,$$

где $0 \leq \delta_j \leq 1$ являются весовыми коэффициентами важности соответственно времени (δ_1) и стоимости (δ_2) движения по сети, T – время перемещения транспорта по сети, Q – затраты на перемещение транспорта [1]. Верхний индекс у переменных означает их нормирование соответствующими максимальными величинам, необходимое для сведения критерия к скалярной величине изменяющейся на интервале $[0,1]$.

Указанные характеристики сети (пропускная способность, время перемещения, затраты) изменяются согласно заданным параметрам цепи Маркова и зависят от износа участков ТСС. По мере увеличения уровня износа дорог пропускная способность сети уменьшается, а материальные и временные затраты транспортных средств, движущихся по сети, увеличиваются.

Соотношение показателей максимальной пропускной способности и качества обслуживания, определяемое с учетом экспертных оценок дает показатель уровня организации ТСС, на основании которого в дальнейшем может производиться выбор либо структуры сети, либо схемы обслуживания, либо их комбинация. При решении задачи ранжирования вариантов организации и обслуживания ТСС, простым и показательным параметром является отношение показателя качества к потоку – эксплуатационная нагрузка

$$EN = \frac{W}{PR}.$$

Чем данный показатель выше, тем большие затраты приходится на единицу транспортного потока.

2 Идея метода вероятностно-алгебраического моделирования

Метод ВАЛМ представляет собой сочетание статического моделирования, отображающего процессы взаимного влияния структурных составляющих системы, и динамического моделирования, позволяющего оценить временную эволюцию отдельных компонентов и всей системы в целом.

Система формализуется в виде множества компонентов $K = \{K_i\}, i = \overline{1, m}$, согласованное взаимодействие которых обеспечивает функционирование системы. Компоненты могут находиться в одном из множества состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1, n}$, характеризующих исследуемые свойства системы (надёжность, пропускная способность и другие). Вероятности нахождения компонентов системы в каждом из состояний задаются векторами вероятностей:

$$P^i = (p_1^i, p_2^i, \dots, p_n^i), \quad \sum_{j=1}^n p_j^i = 1, \quad i = \overline{1, m}.$$

Предполагается, что компоненты системы независимы и между ними могут быть установлены функциональные связи с учётом целей исследования, которые описываются набором функций $F = \{F_z\}$.

Элементы вектора вероятностей результирующего вектора p^3 , полученного в результате умножения векторов p^1 и p^2 , определяются по формуле:

$$p^3 = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \alpha_{ij}^k p_i^1 p_j^2, \quad i, j, k = \overline{1, n}.$$

Коэффициенты α_{ij}^k , называемые коэффициентами ВАЛМ, удовлетворяют следующим требованиям: $\sum_{k=1}^n a_{ijk} = 1, a_{ijk} \geq 0, \forall i, j, k$.

В случае детерминированных связей между компонентами исследуемой системы коэффициенты ВАЛМ определяются следующим образом:

$$\begin{cases} a_{ij}^k = 1, & k = F(i, j); \\ a_{ij}^k = 0, & k \neq F(i, j). \end{cases}$$

Основу метода моделирования составляет алгебраический аппарат [6]. Метод ВАЛМ реализует процесс формирования вектора вероятностей состояний системы по векторам вероятностей состояний составляющих систему компонентов с учётом установленных между ними связей [7].

3 Методика оценки вероятностных характеристик свойств транспортной сети сообщения

Определение вероятностных характеристик ТСС реализуется с использованием системы

вероятностно-алгебраического моделирования PALS (Probability-Algebraic Simulation), представленной в работе VI Международной конференции «Информационные системы и технологии» (Information Systems & Technologies – IST'2010). Методология применения системы определяется следующей последовательностью шагов.

На *шаге 1* выделяется множество элементарных участков исследуемой потоковой системы и связей между ними. В диалоговом режиме с использованием стандартных компонентов $K = \{K_i\}$ и библиотеки функций $F = \{F_z\}$ формируется графическая схема $G(F, K)$ исследуемой системы. Учитывая характерные особенности ТСС (сугубо параллельно-последовательный характер связей компонентов) графическая схема системы будет представлять собой дерево. Листьями дерева являются компоненты исследуемой системы, а узлами – функции, определяющие связи между компонентами системы.

На *шаге 2* на основе натурных экспериментов с прототипом потоковой системы или методом экспертных оценок реализуется подготовка параметров моделирования.

На *шаге 3* для каждого компонента задается количество состояний $S = \{S_j\}, j = \overline{1, n}$ и начальные вектора вероятностей p^{i0} , характеризующие эти состояния:

$$P^{i0} = (p_1^{i0}, p_2^{i0}, \dots, p_n^{i0}), \sum_{j=1}^n p_j^{i0} = 1, i = \overline{1, m}. \quad (3.1)$$

Для этой цели используются соответствующие средства ввода информации PALS, которые автоматически заносят в базу данных исходные данные.

На *шаге 4* осуществляется задание времени моделирования и выбор способа формирования значений векторов вероятностей, характеризующих изменение пропускной способности компонентов во времени:

$$P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, \dots, p_n^{it}), \sum_{j=1}^n p_j^{it} = 1, t = \overline{1, T}. \quad (3.2)$$

Одним из способов, определяющих динамическое изменение векторов вероятностей (3.2), является первичное моделирование с использованием марковской модели с дискретным временем и дискретными состояниями, переходная матрица которой имеет вид:

$$QK_i = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & \dots & p_{n-1} & p_n \\ 0 & \sum_{i=1}^2 p_i & \dots & p_{n-1} & p_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \sum_{i=1}^{n-1} p_{n-1} & p_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

Возможен переход к рассмотрению процессов вероятностных изменений участков потоковой системы с восстановлением. В зависимости от стратегий восстановления компонентов выбирается одна из имеющихся параметризованных моделей Маркова. Параметры моделей определяются в результате алгоритмической обработки данных натурных экспериментов.

Альтернативным способом задания динамического изменения векторов вероятностей является описание элементов исходных векторов вероятностей (3.1) параметрическими функциями. Использование в качестве параметра функций времени позволяет управлять скоростью изменения вероятностных характеристик компонентов. Проведение статического моделирования, реализуемого одной итерацией, при параметрическом задании исходных векторов (3.1) позволяет сформировать результирующий вектор, характеризующий пропускную способность потоковой системы в символьном виде.

На *шаге 5* в соответствии с заданным временем моделирования проводится динамическое ВАЛМ, представляющее собой итерационный процесс, проводимый с учетом вероятностного изменения состояний компонентов. При этом неоднократно реализуется статическое моделирование, осуществляющее свёртку исходных векторов вероятностей состояний компонентов с учётом уровня вложенности функций и коэффициентов ВАЛМ.

На *шаге 6* по желанию пользователя результаты моделирования графически отображаются в виде временных диаграмм, представляющих изменение пропускной способности как отдельных участков, так и всей потоковой системы, либо в табличной форме экспортируются в электронные таблицы MS Excel.

На *шаге 7* (для случая исследования реальной функционирующей потоковой системы) осуществляется проверка адекватности построенной вероятностно-алгебраической модели реальному объекту. В PALS она автоматически проводится путём проверки близости средних значений откликов модели соответствующим характеристикам реальной потоковой сети. В случае отрицательных результатов осуществляется переход на шаг 4.

На *шаге 8* определяется влияние вероятностных характеристик пропускной способности участков потоковой сети на значение компонентов вектора откликов всей системы при её фиксированной структурной организации. С этой целью организуются модельные эксперименты, в которых, во-первых, варьируются значения векторов (3.1), что позволяет оценить влияние начального состояния участков системы на результирующее состояние всей сети. Во-вторых, для рассмотрения возможных режимов эксплуатации потоковой системы изменяются параметры

марковских моделей участков, описывающие вероятностное изменение исследуемых характеристик системы во времени.

На *шаге 9* исследуется влияние структурной организации потоковой системы при неизменных вероятностных значениях параметров компонентов на векторы откликов моделирования. При этом могут быть рассмотрены следующие случаи: введения новых участков, увеличивающих пропускную способность «узких мест» сети, обнаруженных при исследовании исходного структурного варианта сети; исключения участков, пропускная способность которых обращается в ноль в результате аварий (профилактического ремонта); рассмотрения альтернативного варианта структурной организации потоковой сети. Сравнение результирующих векторов пропускной способности сети для различных вариантов её структурной организации позволит выбрать лучший из них, а также оценить эффективность резервирования отдельных участков сети.

4 Пример анализа организации транспортной сети сообщения на основе ВАЛМ

Проведём исследование вероятностных характеристик организации ТСС методом ВАЛМ. Согласно методу на начальном этапе моделирования необходимо произвести полную формализованную постановку задачи моделирования, включающую разработку графической схемы модели системы $G(F, K)$; задание параметров изменения элементарных компонентов K системы во времени; задание критерия функционирования системы, определяемого допустимыми границами изменения контролируемых параметров. В качестве объекта исследования рассмотрим сеть, изображённую на рисунке 1.

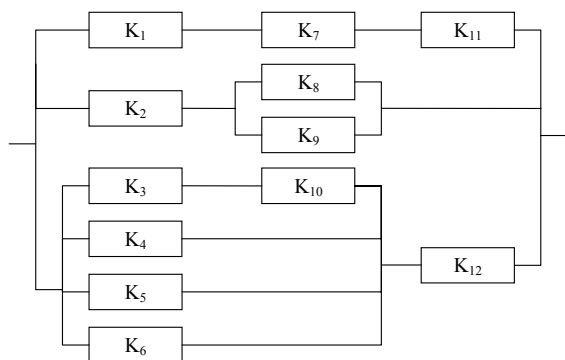


Рисунок 1 – Структура исследуемой транспортной сети сообщения

Представленная на рисунке графовая структура интерпретируется при ВАЛМ с учётом выделенных ключевых параметров организации сети – пропускной способности и качества обслуживания. Компонентами исследуемой системы являются участки дорог $K = \{K_i\}$, $i = \overline{1, 12}$

которые в процессе эксплуатации подвергаются процессу накопления повреждений, определяющих уровень износа и пропускную способность.

Участки дорог описываются однотипным образом и характеризуются множеством состояний $S = \{S_j\}$, $j = \overline{1, 10}$, соответствующих определённому уровню износа. Состояние S_1 описывает максимально новый участок, которому соответствует максимальная пропускная способность PR_1 и минимальное значение показателя временных и материальных затрат W_1 . Состояние S_{10} характеризует критический уровень накопления повреждений, при котором пропускная способность PR_{10} становится меньше допустимой ($PR_{10} < PR_d$), а затраты на перемещение превышают заданную величину ($W_{10} > W_d$). Остальные выделенные состояния необходимы для более детального рассмотрения износа сети.

Вероятностное изменение состояний участков дорог описывается марковскими процессами с дискретными состояниями и временем. Матрицы переходных вероятностей QK_i для всех компонентов различны и формируются в результате статистического анализа данных, характеризующих износ участков. Предполагается, что начальные значения вероятностей состояний износа участков носят случайный характер и задаются вектором $P^{i0} = (p_1, p_2, p_{10})$, $i = \overline{1, 12}$.

Последующие этапы метода ВАЛМ реализуемые PALS состоят в построении алгебраической модели процесса функционирования системы (включающей композицию элементарных устройств модели и функций связи) с последующим преобразованием алгебраической модели в вероятностную форму и расчетом искомых показателей системы.

На рисунке 2 представлена графическая схема вероятностно-алгебраической модели ТСС.

В зависимости от исследуемых параметров функции, указанные на рисунке 2, задаются выражениями: при исследовании пропускной способности

$$F_1(i, j) = \min(i + j - 1, n), \\ F_2(i, j) = \max(i, j);$$

для расчета показателя качества функционирования сети

$$F_1(i, j) = \min(i, j), \quad F_2(i, j) = \min(i + j - 1, n).$$

Полученные в результате моделирования значения векторов вероятностей характеризуют износ отдельных участков и всей сети на заданном промежутке времени:

$$P^{it} = (p_1^{it}, p_2^{it}, \dots, p_{10}^{it}), \\ \sum_{j=1}^{10} p_j^i = 1, i = \overline{1, 12}, t = \overline{1, 100}.$$

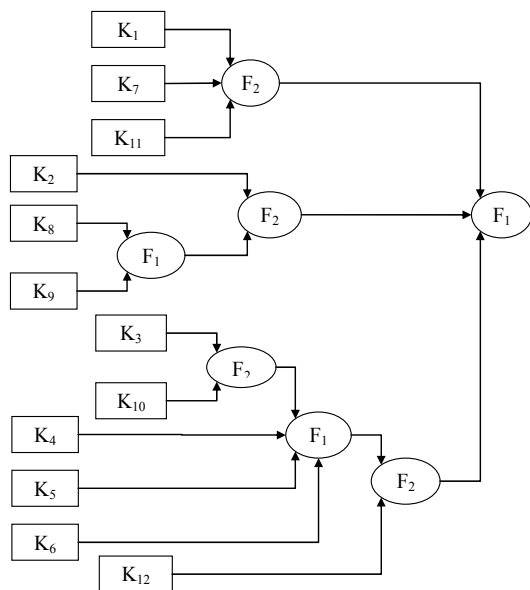


Рисунок 2 – Графическая схема вероятностно-алгебраической модели транспортной сети сообщения

Результаты моделирования распределения вероятностей нахождения сети в одном из множества состояний $\{S_1, \dots, S_{10}\}$ для показателей пропускной способности (PR) и качества функционирования (W) представлены в графическом виде на рисунках 3 и 4.

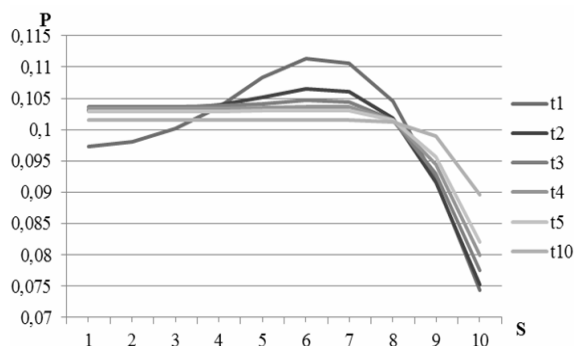


Рисунок 3 – Динамика изменения показателя пропускной способности транспортной сети сообщения

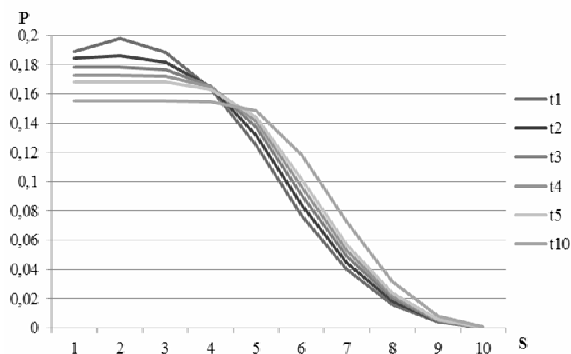


Рисунок 4 – Динамика изменения коэффициента стоимости обслуживания транспортной сети сообщения

Согласно цели приводимого исследования, необходимо рассмотреть и оценить несколько альтернатив организации обслуживания сети.

Предполагаем, что структура сети неизменна, то есть можем влиять на качество организации сети только путем изменения качества обслуживания ее структурных компонентов. Такая ситуация наиболее широко распространена на практике. Допустим так же, что задача определения уровня значимости (вкладов) элементов системы уже решена (решается на базе ЛВИ[8]). Для данной системы наибольший уровень значимости имеет компонент K_{12} . Тогда изменяя параметры обслуживания данного компонента (из имеющихся трех альтернативных вариантов) получим различные значения показателей пропускной способности, качества обслуживания и уровня организации ТСС.

Для определения и выбора наиболее рационального варианта обслуживания ТСС, исходя из базовых данных рассчитываем показатель эксплуатационной нагрузки (ЕН) для имеющихся альтернатив. Графики изменения с течением времени данных показателей для трех вариантов организации сети приведены на рисунке 5. Как видно из графиков, более рациональна организация обслуживания сети, рассматриваемая во второй альтернативе (v_2), поскольку показатель эксплуатационной нагрузки принимает в этом случае наименьшие значения.

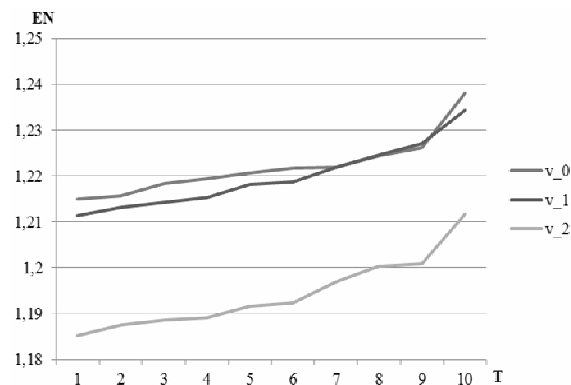


Рисунок 5 – Динамика изменение показателя эксплуатационной нагрузки различных вариантов организации обслуживания транспортной сети сообщения

Таким образом, оперируя данными о вероятности пребывания отдельных участков ТСС в определенном состоянии в конкретный момент времени и зная структуру сети, с помощью метода ВАЛМ возможно получение данных о состоянии всей системы в целом и динамике изменения ее характеристик. Изменение параметров моделирования износа участков позволяет решать задачи анализа работы сети в различных эксплуатационных режимах, судить о рациональности организации функционирования ТСС.

Заключение

Новый метод ВАЛМ, сочетающий в себе элементы динамического и статического моделирования, является универсальным средством исследования характеристик сложных систем, задаваемых с помощью графов. Опираясь на вероятностными величинами, он позволяет производить прогнозирование, отслеживать в динамике изменение исследуемых свойств системы.

Применение методики оценки организации ТСС с использованием ВАЛМ позволяет решать следующие задачи: статически и в динамике провести сравнительный анализ различных структурных вариантов системы; подобрать параметры компонентов, обеспечивающих необходимый уровень показателя эксплуатационной нагрузки; оценить влияние участков ТСС и их групп на параметры всей сети. Реализованная на базе метода программа PALS выполняет функции автоматизированной системы поддержки принятия решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вероятностно-алгебраическое моделирование потоковых систем* / Е.И. Сукач [и др.] // Современные информационные компьютерные технологии mcIT-2010 [Электронный ресурс] : материалы II Международной научно-практической конференции. – Гродно, 2010. – 1 электр. компакт диск (CD-R). – 995 с. – Рус. – Деп. в ГУ «БелИСА» 24.05.2010 г., № Д201019.
2. *Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности систем АРБИТР (ПК АСМ СЗМА), базовая версия 1.0*

[Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.szma.ru/pkasm.shtml>

3. *Relex Reliability Studio*. [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.relex.se/>

4. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М. : Гл. редакция физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1968. – 356 с.

5. Сукач, Е.И. Вероятностно-алгебраический метод моделирования сложных систем / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, В.Н. Кулага // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2009: материалы научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 21–23 октября 2009 г.) В 2 т. Т. 1. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 187–191.

6. Сукач, Е.И. Моделирование вероятностных характеристик сложных систем с использованием стохастических алгебр / Е.И. Сукач, Д.В. Ратобильская, В.Н. Кулага // Информационные системы и технологии (IST'2009) : материалы V Междунар. Конф-форума (Минск, 16–17 нояб. 2009 г.). В 2 ч. Ч. 1. / редкол. : Н.И. Листопад [и др.]. – Минск : Ф.Н. Вараксин, 2009. – С. 178–182.

7. *Computer modeling of the reliability of functionally complex systems* / E.I. Sukach [et al.] / Computer Data Analysis and Modeling: Complex Stochastic Data and Systems: Proc. Of the Ninth Intern.Conf., Minsk, Sept. 7–11, 2010. In 2 vol. Vol. 2. – Minsk : Publ. Center of BSU, 2010. – P. 198–202.

8. Рябинин, И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И.А. Рябинин. – СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2007. – 276 с.

Поступила в редакцию 01.03.11.